УДК 621.86

Бурков Петр Владимирович[1,2], доктор технических наук, профессор, **Бурков Владимир Петрович**[1], ассистент, **Тимофеев Вадим Юрьевич**[1], кандидат технических наук, доцент, **Щадрина Анастасия Викторовна**[1], доктор технических наук, доцент, **Саруев Лев Алексеевич**[1], доктор технических наук, профессор, **Буркова Светлана Петровна**[1], кандидат технических наук

[1]Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, ул. Ленина, 30
[2]Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, Россия, г. Томск, пл. Соляная, 2

E-mail: tv-ytitpu@mail.ru

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ СТАНКОВ ДЛЯ БУРЕНИЯ СКВАЖИН С РАЗЛИЧНЫМИ ТИПАМИ ПРИВОДОВ

Аннотация: *В статье описаны математические модели работы лебедок барабанного типа и лебедок с канатоведущим шкивом. Представленные математические модели описывают динамические процессы в приводном асинхронном двигателе лебедки и используют модель асинхронного двигателя в заторможенной системе координат. Представляемая математическая модель работы лебедок базируется на решении уравнений электромеханического преобразования энергии, а также на решении нелинейных дифференциальных уравнений равновесия напряжений контуров и моментов численными методами. В работе представлено математическое описание механической части лебедки барабанного типа. При разработке математического описания лебедок они рассматривались как двухмассовые системы. Математическая модель работы лебедки барабанного типа учитывает жесткость системы, возможные демпфирования каната, потери электромеханической энергии, моменты сил инерции вращающихся масс, демпфирования опорных поверхностей, массу опоры лебедки и массу груза, тормозной момент. Также представлено математическое описание механической части лебедки с канатоведущим шкивом. Математическая модель работы лебедки с канатоведущим шкивом учитывает возникающий тормозной момент, жесткость системы, демпфирования каната, потери электромеханической энергии, силы трения, моменты сил инерции от вращающихся масс лебедки, массу грузоподъемного каната, массу противовеса, массу клети.*

Ключевые слова: *грузоподъемная машина, лебедка барабанного типа, лебедка с канатоведущим шкивом, математическая модель, Simulink.*

Информация о статье: *принята 19 ноября 2018 г.*
DOI: 10.26730/1816-4528-2018-5-3-10

Актуальность работы (The urgency of the discussed issue):

Тенденция развития современных станков для бурения скважин характеризуется последовательным наращиванием величины их характеристик. Проектировщики машин идут по пути увеличения производительности и снижения времени выполнения операций, что увеличивает динамические нагрузки на ее основные узлы и агрегаты. Для повышения динамичности данных машин необходимо проведение анализа работы всех основных агрегатов и систем по силовым факторам. Решение задач динамики позволит еще на стадии проектирования создавать машины с рациональной конструкцией, оценивать ее прочностные и энергетические характеристики, а также обосновывать последующие технологические решения [1, 2, 3].

Одним из ключевых узлов в машинах данного типа являются лебедка. Данный узел имеет различные варианты конструкции, такие как лебедки барабанного типа (БТ) и лебедки с канатоведущим шкивом (КВШ). Работа данных узлов неизбежно сопровождается динамическими процессами в их приводных двигателях, поэтому изучение протекающих в них динамических процессов должно помочь решить проблему повышения динамичности, надежности и, соответственно, улучшить экономические показатели машины [4, 5, 6].

Цель работы (The main aim of the study):

Разработка математической модели, описывающей динамические процессы в приводном двигателе для лебедок БТ и для лебедок с КВШ.

Постановка задачи (The wording of the problem):

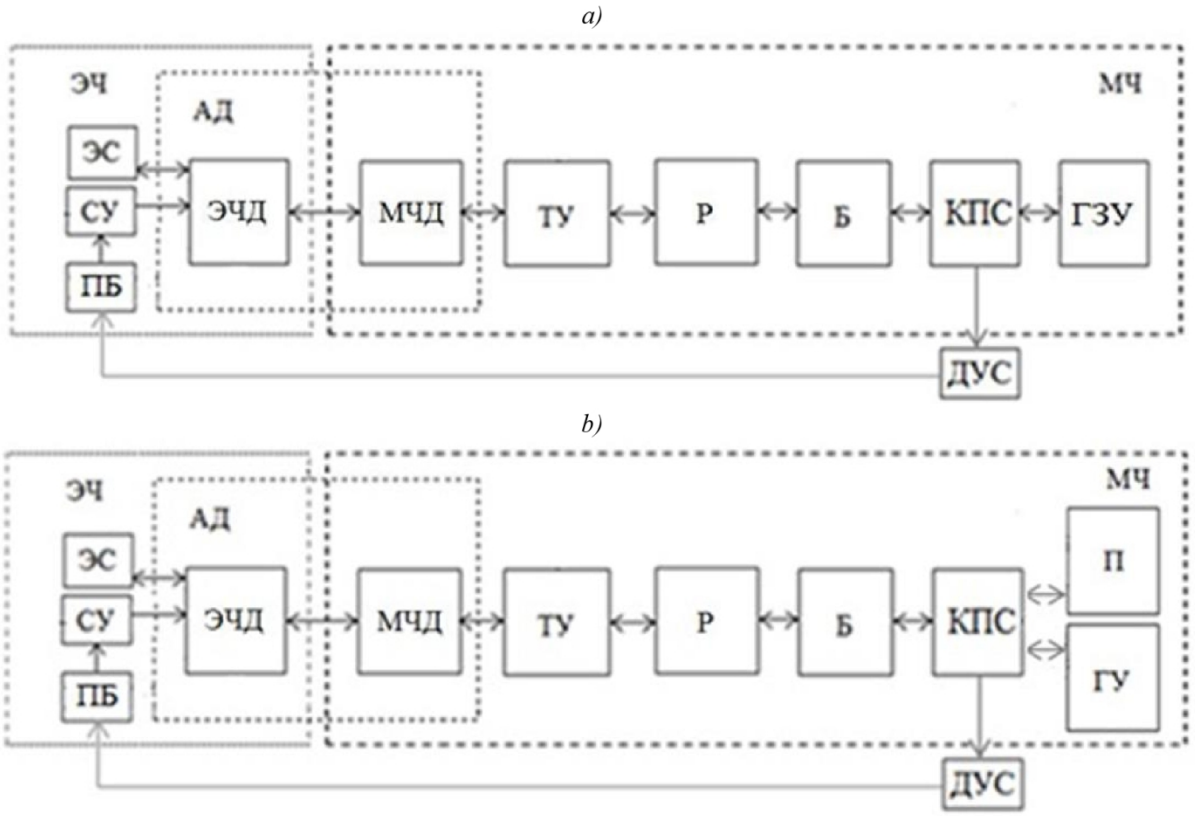

Рис. 1. Функциональная схема грузоподъемной лебедки а) барабанного типа b) с канатоведущим шкивом

ЭЧ – электрическая часть; АД – асинхронный электродвигатель; ЭЧД – электрическая часть асинхронного электродвигателя; МЧ – механическая часть; МЧД – механическая часть асинхронного электродвигателя; ТУ – тормозное устройство; Р – редуктор; Б – грузовой барабан; КПС – канатно-полиспастная система; ДУС – датчик усилия; П – противовес; ГЗУ – грузозахватное устройство; ГУ – грузовое устройство; ЭС – электрическая сеть; СУ – система управления; ПБ – прибор безопасности

Fig. 1. Functional diagram of the hoisting winch a) drum type b) with a traction sheave

ECh – electrical domain; AD – asynchronous electric motor; EChD – electrical part of asynchronous electric motor; MCh – mechanical part; MChD – mechanical part of the asynchronous electric motor; TU – braking device; R – reducer; B – cargo drum; KPS – rope-polyspast system; DUS – force sensor; P – counterweight; GZU – hoisting device; GU – hoisting device; ES – mains; SU – control system; PB – safety device

Электромеханическая система (ЭМС) в лебедке обеспечивает управляемое электромеханическое преобразование энергии, необходимой для осуществления непосредственно ее собственных функций [7, 8]. ЭМС состоит из силового и информационного каналов, которые непрерывно и взаимосвязанно взаимодействуют с целью управления рабочим органом узла и всей машины. Силовой канал ЭМС в данном случае состоит из электрической сети, различных преобразователей энергии и непосредственно рабочего органа. Информационный канал ЭМС создается подсистемой управления отдельными компонентами лебедки, различного рода преобразователями координат, а также системой управления в целом [1, 9, 10, 11]. Управление и взаимная увязка силового и информационного каналов с целью повышения динамичности машины являются одной из актуальных научно-практических задач.

Методы исследования и математическое моделирование (The methods used in the study and mathematical modeling):

В настоящее время математическое моделирование с использованием различных расчетных методов широко используется в горном деле. Специализированное программное обеспечение, реализующее расчетные методы, широко и прочно закрепилось как инструмент научного познания в различных отраслях горной науки [12, 13, 14]. Основная идея всех программ, реализующих численное моделирование – это замена реального объекта или явления численной моделью с целью изучения его поведения и имитации различных вариантов протекания явления или процесса. Численное моделирование не исключает создание математической модели явления или процесса и при этом дешевле, безопасней, а также является незаменимым, т.к. зачастую часть явлений невозможно повторить экспериментально.

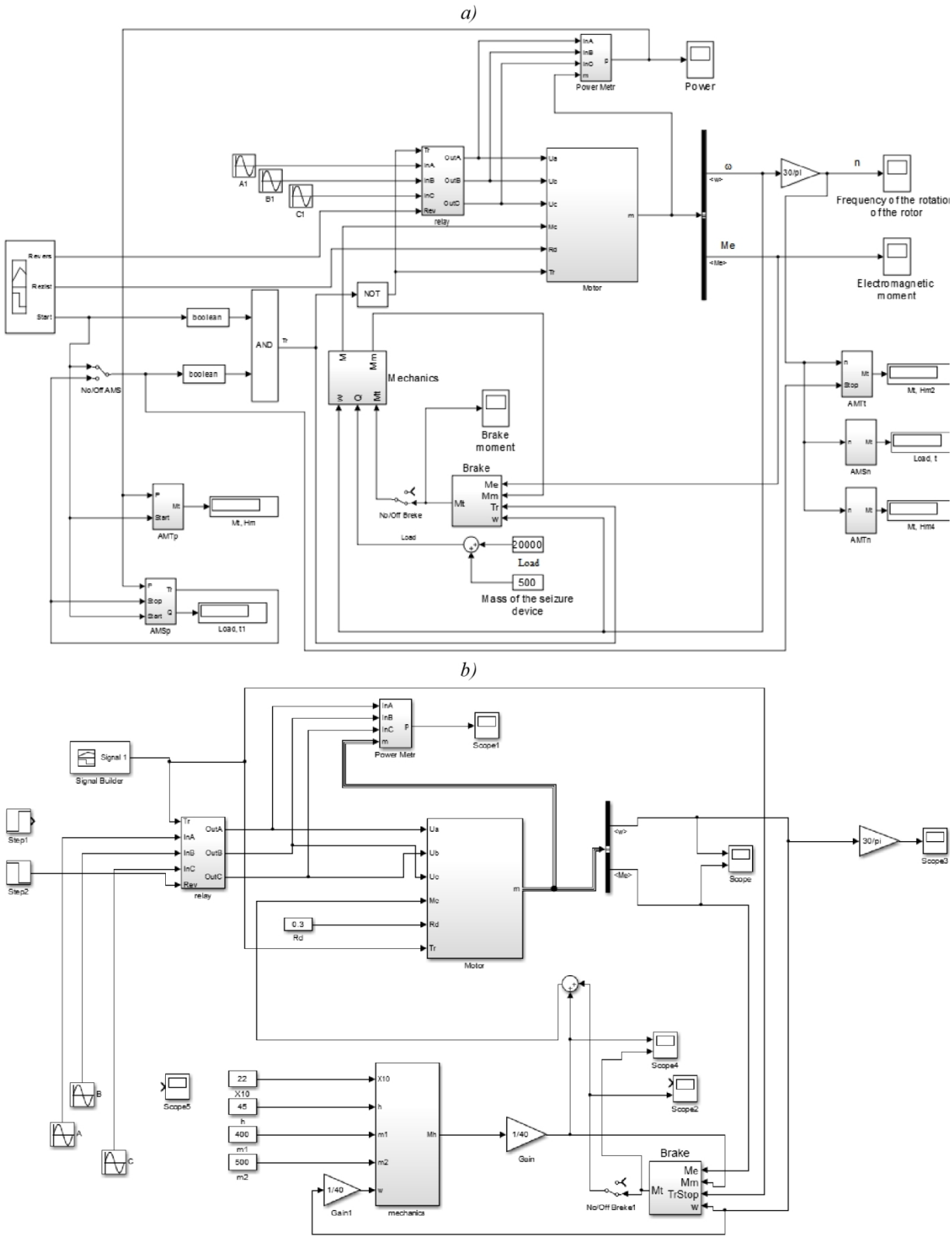

Рис. 2. Блок-схема расчетной модели лебедки в программе Matlab Simulink 6.5 а) барабанного типа b) с канатоведущим шкивом

Fig. 2. Block diagram of the program for calculating the winch model in the program Matlab Simulink 6.5 a) drum type b) with a traction sheave

Одним из современных и популярных приложений, реализующих математическое моделирование динамических процессов механических систем, является программа Simulink. Данное программное обеспечение представляет собой графическую среду программирования для моделирования и анализа многоэлементных динамических систем. Его основным интерфейсом является графический инструмент построения диаграмм и настраиваемый набор библиотек блоков. Simulink широко используется в автоматическом контроле и цифровой обработке сигналов для многоэлементных динамических

систем [12, 15, 16]. Для моделирования динамических процессов в лебедках БТ и в лебедках с КВШ с применением Simulink необходимо создать математическую и численную модель их работы. Полученные при моделировании результаты напрямую зависят от учтенных в расчетной модели количества параметров. Точность модели растет пропорционально количеству учтенных параметров, однако при попытке учесть максимально возможное количество реальных свойств лебедки смоделированная динамическая схема получается весьма сложной и труднообрабатываемой, следовательно, определение динамических нагрузок является сложной, а зачастую невыполнимой задачей. В связи с этим для получения корректного решения с допустимой погрешностью в модели делаются некоторые допущения, а сама модель учитывает только те свойства, которые напрямую влияют на исследуемые процессы [12, 15, 17]. В данном случае для упрощения модели в расчетную схему вводят несколько масс (в данном случае две), что даст существенное упрощение математического описания и со степенью точности, удовлетворяющей требованиям практики, определит закономерности движения элементов лебедок в переходных процессах в общем, а также изменения мощности двигателя, частоты вращения при разгонах и торможениях в частности [12, 18]. При этом данная модель учитывает изменение частоты вращения при разгоне и торможении, мощность двигателя, упругие деформации отдельных элементов механизма, а также инерционные составляющие динамических усилий, передаваемых канатами, валами и т.д.

На рисунке 1 представлены функциональные схемы исследуемых грузоподъемных лебедок.

На рисунке 2 представлены функциональные блок-схемы грузоподъемных лебедок, реализованные в программном обеспечении Matlab Simulink 6.5.

Для моделирования лебедки БТ использованы блоки motor, mechanics, brake (рисунок 2a). Блок motor реализует математическую модель асинхронного электрического двигателя АД в качестве привода лебедки. Блок mechanics реализует расчет крутящих моментов, приведенных к валу электродвигателя МС1, МИН1, с учетом жесткости, демпфирования каната и опоры лебедки. Блок brake используется для приведения к валу двигателя тормозного момента МТ1. Аналогичным образов реализована модель лебедки КВШ (рисунок 2b). Исключение составляет блок mechanics, т.к. в нем учтены особенности КВШ. Уравнения в блоке motor и brake использовались без изменений.

Следующим этапом создания математической модели, изучающей динамические процессы в приводном двигателе для лебедок БТ и для лебедок с КВШ, является математическое описание процессов в численной модели, полученной с помощью программного обеспечения Matlab Simulink 6.5. В данном случае дифференциальные уравнения, описывающие процессы в ЭМС и ее компонентах, являются наиболее распространенной формой математического описания ЭМС [19]. При представлении моделей ЭМС исследователи традиционно используют нормальную форму Коши для дифференциальных уравнений или реализуют процедуру приведения к этой форме [1]. Использование линейных интегральных преобразований Лапласа и Фурье позволяет значительно упрощать решение систем дифференциальных и интегральных уравнений, получать аналитические решения, использовать для синтеза систем управления методы линейной алгебры и реализовывать методы частотного анализа [1, 2, 19, 20]. Рассматривая в качестве примера двухмассовую электромеханическую систему (ДЭМС) лебедки БТ, приведем линеаризованную систему нормированных уравнений, представленную в приращениях:

$$\begin{cases} \Delta\bar{\omega}_1 = \dfrac{1}{T_{M1}\cdot p}\cdot[\Delta\bar{M}_D - \Delta\bar{M}_{21} - k_C\cdot(\Delta\bar{\omega}_1 - \Delta\bar{\omega}_2) - k_{f1}\cdot\Delta\bar{\omega}_1] \\ \Delta\bar{M}_{21} = \dfrac{1}{T_C\cdot p}\cdot(\Delta\bar{\omega}_1 - \Delta\bar{\omega}_2) \\ \Delta\bar{\omega}_2 = \dfrac{1}{T_{M2}\cdot p}\cdot[\Delta\bar{M}_{21} - \Delta\bar{M}_C + k_C\cdot(\Delta\bar{\omega}_1 - \Delta\bar{\omega}_2) - k_{f2}\cdot\Delta\bar{\omega}_2] \\ \Delta\bar{M}_D = \Delta\bar{I}_Y \\ \Delta\bar{I}_Y = \dfrac{1}{T_Y\cdot p}\cdot -\Delta\bar{I}_Y + \dfrac{1}{\rho_Y}\cdot(\Delta\bar{E}_Y - \Delta\bar{\omega}_1) \end{cases} \quad (1)$$

где $\Delta\bar{\omega}_1, \Delta\bar{\omega}_2, \Delta\bar{M}_D, \Delta\bar{I}_Y, \Delta\bar{E}_Y$ – приращения угловых скоростей первой и второй массы, момента электродвигательного устройства, тока в цепи якоря, момента в упругой передаче, ЭДС управляемого преобразователя ДЭМС соответственно, выраженные в относительных единицах от выбранных базовых значений;

T_{M1}, T_{M2} – механические постоянные времени первой и второй масс;

T_C – постоянная времени жесткости упругого звена;

k_C – относительное значение коэффициента внутреннего трения;

k_{f1}, k_{f2} – относительные значения коэффициентов вязкого трения в массах;

T_Y – постоянная времени якорной цепи;

ρ_Y – относительное сопротивление якорной цепи.

В пространстве состояний математическая модель ДЭМС может быть представлена матричным уравнением:

$$\dot{X} = A\cdot x + B\cdot u \quad (2)$$

где $x = [x_1\cdot x_2\cdot x_3\cdot x_4]^m = [\Delta\bar{I}_Y\cdot\Delta\bar{\omega}_1\cdot\Delta M_{21}\cdot\Delta\bar{\omega}_2]^m$;

$u = [\Delta\bar{E}_Y\cdot\Delta\bar{M}_C]$;

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_Y} & -\frac{1}{T_Y\cdot\rho_Y} & 0 & 0 \\ \frac{1}{T_{M1}} & \frac{k_C+k_{f1}}{T_{M1}} & -\frac{1}{T_{M1}} & \frac{k_C}{T_{M1}} \\ 0 & \frac{1}{T_C} & 0 & -\frac{1}{T_C} \\ 0 & \frac{k_C}{T_{M2}} & \frac{1}{T_{M2}} & -\frac{k_C+k_{f1}}{T_{m2}} \end{bmatrix};$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_Y \cdot \rho_Y} & \bullet & 0 \\ 0 & \bullet & 0 \\ 0 & \bullet & 0 \\ 0 & \bullet & -\frac{1}{T_{M2}} \end{bmatrix}.$$

Матричная передаточная функция ДЭМС определяется в соответствии с выражением:

$$W(p) = (p \cdot I - A^{-1}) \cdot B = \frac{adj(p \cdot I - A)}{F(p)} \cdot B \qquad (3)$$

где I – единичная матрица;

$adj(p \cdot I - A)$ – присоединенная матрица;

$F(p) = det(p \cdot I - A)$.

Силы трения в массах и внутреннее трение в упругой механической связи улучшают демпфирующие свойства ДЭМС, поэтому рассмотрен случай, при котором вышеуказанные силы трения отсутствуют, а условия демпфирования колебаний в ДЭМС являются более трудными. Матричная передаточная функция такой ДЭМС может быть получена из выражений (2) и (3) при значениях $k_C = k_{f1} = k_{f2} = 0$.

$$W(p) = \frac{1}{F(p) \cdot \rho_Y \cdot T_Y \cdot T_{M1} \cdot T_{M2} \cdot T_C} \cdot \begin{bmatrix} T_M \cdot p \cdot (T_y^2 \cdot p^2 + 1) & 1 \\ \gamma \cdot T_y^2 \cdot p^2 + 1 & -\rho_Y \cdot (T_Y \cdot p + 1) \\ T_{M2} \cdot p & -\rho_Y \cdot T_{M1} \cdot p \cdot (T_Y \cdot p + 1) + 1 \\ 1 & -\rho \cdot (T_Y \cdot p + 1) \cdot (T_C \cdot T_{M1} \cdot p^2 + 1) + T_C \cdot p \end{bmatrix}$$

где $T_M = T_{M1} + T_{M2}$ – суммарная механическая постоянная времени;

$\gamma = \frac{T_M}{T_{M1}}$ – коэффициент соотношения масс;

$T_y = \sqrt{\frac{T_{M1} \cdot T_{M2} \cdot T_C}{T_M}}$;

$F(p) = \frac{\rho_Y \cdot T_M \cdot p \cdot (T_Y \cdot p + 1) \cdot (T_y^2 \cdot p^2 + 1) + (\gamma \cdot T_y^2 \cdot p^2 + 1)}{\rho_Y \cdot T_Y \cdot T_{M1} \cdot T_{M2} \cdot T_C}$.

Передаточные функции ДЭМС для некоторых координат будут иметь следующий вид:

$$W_1(p) = \frac{\Delta \bar{I}_Y(p)}{\Delta \bar{E}_Y(p)} = \frac{T_M \cdot p \cdot (T_y^2 \cdot p^2 + 1)}{\rho_Y \cdot T_M \cdot p \cdot (T_Y \cdot p + 1) \cdot (T_y^2 \cdot p^2 + 1) + (\gamma \cdot T_y^2 \cdot p^2 + 1)}$$

$$W_2(p) = \frac{\Delta \omega_1(p)}{\Delta \bar{E}_y(p)} = \frac{(\gamma \cdot T_y^2 \cdot p^2 + 1)}{\rho_Y \cdot T_M \cdot p \cdot (T_Y \cdot p + 1) \cdot (T_y^2 \cdot p^2 + 1) + (\gamma \cdot T_y^2 \cdot p^2 + 1)}$$

$$W_3(p) = \frac{\Delta \omega_2(p)}{\Delta \bar{E}_y(p)} = \frac{1}{\rho_Y \cdot T_M \cdot p \cdot (T_Y \cdot p + 1) \cdot (T_y^2 \cdot p^2 + 1) + (\gamma \cdot T_y^2 \cdot p^2 + 1)}$$

$$W_4(p) = \frac{\Delta \omega_2(p)}{\Delta \omega_1(p)} = \frac{1}{\gamma \cdot T_y^2 \cdot p^2 + 1}$$

Выводы (Conclusion):

Разработанные математические модели лебедок БТ и лебедок с КВШ описывают динамические процессы, происходящие в приводном двигателе, и используют модель АД в заторможенной системе координат на основе совместного решения численными методами нелинейных дифференциальных уравнений равновесия напряжений контуров, моментов и уравнения электромеханического преобразования энергии.

Предложенное математическое описание механической части лебедок БТ и лебедок с КВШ как двухмассовых расчетных систем учитывает такие параметры, как жесткость системы, демпфирования каната и опорных поверхностей, тормозной момент, момент сил инерции вращающихся масс и потерю электромеханической энергии, массу груза и массу опоры лебедки БТ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Направления исследований по повышению ресурса узлов трения в приводах скиповых лебедок доменного цеха ОАО «ММК» / Е. И. Мироненков [и др.] // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова : науч. тр. / МГТУ им. Г.И. Носова. – Магнитогорск, 2008. – №. 3. – С. 46-48.

2. Динамика электрической подъемной лебедки / Н. Л. Великанов [и др.] // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия: Физико-математические и технические науки : науч. тр. / БФУ им. И. Канта. – Калининград, 2017. – Т. 78. – №. 8. – С. 91-100.

3. Yunfei-Chen. Simulation research of heave compensation winch based on virtual prototype / Tibing-Xiao, Lei-Chen // 2017 IEEE International Conference on Cybernetics and Intelligent Systems (CIS) and IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics (RAM), 2017. – P. 620-625. DOI: 10.1109/ICCIS.2017.8274849.

4. Петров, В. Л. Математическое моделирование электромеханических систем горных машин на основе идентификации динамических характеристик : дис. … д-р техн. наук – МГГУ, Москва, 2004.

5. Петров, В. Л. Исследование свойств спектральных моделей электромеханических систем горных машин в базисе ортонормированных функций Чебышева-Эрмита // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал) : науч. тр. / Горная книга. М., 2012. – №. 1. – С. 331-334.

6. Huang J. Study of control mode and control strategy for direct drive volume control actuating unit of heave compensation winch / Xiao T., Chen L. // Cybernetics and Intelligent Systems (CIS) and IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics (RAM), 2017 IEEE International Conference on, 2017. – P. 576-580. DOI: 10.1109/ICCIS.2017.8274841.

7. Электропривод буровой лебедки на базе машины двойного питания / В. И. Бабакин [и др.] // Академический журнал Западной Сибири : науч. тр. / М-центр. – Тюмень, 2014. – Т. 10. – №. 4. – С. 36-38.

8. Повышение эффективности крепления подвесных узлов монорельсовых дорог и лебедок в подземных горных выработках / П. В. Гречишкин [и др.] //

Маркшейдерия и недропользование : науч. тр. / Геомар Недра. – М., 2013. – №. 2. – С. 45-48.

9. Абрамов Б. Н. К вопросу повышения тяговой способности лебедок лифтов с канатоведущими шкивами / К. Д. Сипугин // Механизация строительства : науч. тр. / Библио-Глобус. М., 2017. – Т. 78. – №. 6. – С. 36-39.

10. Колодин А. П. Определение области рационального использования станков с различными типами приводов для бурения скважин из подземных горных выработок / А. В. Шадрина, Л. А. Саруев // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов : научн. тр. / ТПУ. – Томск, 2011. – Т. 319. – №. 1. – С. 191-195.

11. Шадрина, А. В. Теоретические и экспериментальные исследования волновых процессов в колонне труб при бурении скважин малого диаметра из подземных горных выработок : дис. … д-р техн. наук – ТПУ, Томск, 2014.

12. Кахиев, Р. Н. Электроприводы грузоподъемных лебедок с повышенной безопасностью : дис. … канд. техн. наук – ТГАСУ, Томск, 2016.

13. Белоглазов, И. И. Применение метода дискретных элементов для моделирования процесса измельчения горных пород в щековой дробилке / Д. А. Иконников // Известия высших учебных заведений. Приборостроение : научн. тр. / ИТМО. – Санкт-Петербург, 2016. – Т. 59. – №. 9. – С. 780-786.

14. Будилова, В. В. Анализ распространения деформаций по земной поверхности при разработке месторождения открытым способом / А. А. Павлович, Д. А. Иконников // Записки Горного института : научн. тр. / СПГУ. – Санкт-Петербург, 2013. – Т. 204. – С. 117-121.

15. Granda, J. J. The role of bond graph modeling and simulation in mechatronics systems: An integrated software tool: CAMP-G, MATLAB–SIMULINK // Mechatronics, 2002. V. 12. – №. 9-10. – P. 1271-1295.

16. Автоматизация и машиностроение [Электронный ресурс] // Режим доступа: https://matlab.ru/solutions/industry/iam – [03.07.2018].

17. Tibing Xiao. Simulation and control of heave compensation winch for ultra-depth floating drilling / Jinyong Huang, Youming Ge // Cybernetics and Intelligent Systems (CIS) and IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics (RAM), 2017 IEEE International Conference, 2017. – P. 609-613. DOI: 10.1109/ICCIS.2017.8274847.

18. Орлов Ю. А. Совершенствование системы защиты и контроля технического состояния электромеханической системы крана мостового типа / Д. П. Столяров, В. П. Бурков // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал) : науч. тр. / Горная книга. М., 2011. – №. S2. – С. 363-368.

19. Петров, В. Л. Обоснование ортонормированных функций для классов спектральных моделей электромеханических систем, характеризующихся различной степенью колебательности // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал) : науч. тр. / Горная книга. М., 2013. – №. 5. – С. 162-173.

20. Бурков В. П. Определение параметров регуляторов в управляемой электромеханической системе на основе спектральной модели в базисе функций Чебышева-Лежандра / В. Л. Петров // Горные науки и технологии : научн. тр. / МИСИС. – М., 2011. – №. 12. – С. 14-19.

Petr V. Burkov [1,2], Dr.Sc, Professor, Professor **Vladimir P. Burkov [1]**, Assistant Professor, **Vadim Yu. Timofeev [1],** Ph.D, Associate Professor, **Anastasia V. Shchadrina [1],** Dr.Sc, Associate Professor, **Lev A. Saruev [1]**, Dr.Sc, Professor, **Svetlana P. Burkova [1]**, Ph.D,

[1]National Research Tomsk Polytechnic University, 30, street Lenina, Tomsk, 634050, Russian Federation
[2]Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Square, Tomsk, 634003, Russian Federation

MATHEMATICAL MODELING OF ELECTROMECHANICAL SYSTEMS OF MACHINES FOR DRILLING OF WELLS WITH VARIOUS TYPES OF DRIVES

Abstract: *The paper describes the mathematical models of the drum-type winches and winches with a traction sheave. The presented mathematical models describe the dynamic processes in the asynchronous drive motor of the winch, and use the model of the asynchronous motor in the braked coordinate system. The presented mathematical model of winches is based on the solution of the equations of Electromechanical energy conversion, as well as on the solution of nonlinear differential equations of the equilibrium stress of circuits and moments by numerical methods. The paper presents a mathematical description of the mechanical part of the drum-type winches. When developing a mathematical description, the winches were considered as a two-mass systems. The mathematical model takes into account the rigidity of the system, the possible damping of the rope, the loss of Electromechanical energy, moments of inertia of the rotating masses, damping of the support surfaces, the weight of the winch support and the weight of the load, braking torque. A mathematical description of the mechanical part of the winch with a rope-carrying pulley is also presented. The mathematical model takes into account the occurring braking moment, the system stiffness, damping of the rope, the loss of mechanical energy, friction, moments of inertia forces of the rotating masses of the winch, the weight of the crate, the weight of the counterweight, the weight of the cargo-hoisting rope.*

Keywords: *hoisting machine, drum-type winch, a winch with a traction sheave, mathematical model, Simulink.*

Article info: *received November 19, 2018*
DOI: 10.26730/1816-4528-2018-5-3-10

REFERENCES

1. Mironenkov E.I., ZHirkin YU.V., CHumikov A.M., Platov S.I. Napravleniya issledovanij po povysheniyu resursa uzlov treniya v privodah skipovyh lebyodok domennogo cekha OAO «MMK» [Areas of research to improve the resource of friction units in the drives of skip winches of the blast furnace shop of MMK Ltd.»]. Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G. I. Nosova [Bulletin of Magnitogorsk state technical University named after G. I. Nosov]. 2008. No. 3. P. 46-48.

2. Velikanov N.L., Koryagin S.I., Naumov V.A., Ahmedov I.M. Dinamika sistemy pod"ema gruza [Dynamics of electric hoist]. Vestnik Baltijskogo federal'nogo universiteta im. I. Kanta. Seriya: Fiziko-matematicheskie i tekhnicheskie nauki [Bulletin of the Baltic Federal University named after I. Kant. Series: Physical, mathematical and technical Sciences]. 2017. No. 8. Vol. 78. P. 91-100.

3. Yunfei-Chen, Tibing-Xiao, Lei-Chen. Simulation research of heave compensation winch based on virtual prototype // 2017 IEEE International Conference on Cybernetics and Intelligent Systems (CIS) and IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics (RAM). 2017. P. 620-625.

4. Petrov V.L. Matematicheskoe modelirovanie ehlektromekhanicheskih sistem gornyh mashin na osnove identifikacii dinamicheskih harakteristik [Mathematical modeling of Electromechanical systems of mining machines on the basis of identification of dynamic characteristics]. Moscow, Publishing of the Moscow State Mining University. 2004. 281 P.

5. Petrov V.L. Issledovanie svojstv spektral'nyh modelej ehlektromekhanicheskih sistem gornyh mashin v bazise ortonormirovannyh funkcij CHebysheva-Hermita [Investigation of the properties of spectral models of Electromechanical systems of mining machines in the basis of orthonormal Chebyshev-Hermit functions]. Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal) [Mining information and analytical Bulletin (scientific and technical journal)]. 2012. No. 1. P. 331-334.

6. Huang J., Xiao T., Chen L. Study of control mode and control strategy for direct drive volume control actuating unit of heave compensation winch // Cybernetics and Intelligent Systems (CIS) and IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics (RAM). 2017. P. 576-580.

7. Babakin V.I., Izotova E.V., Ulyaev R.I., Hisametdinov R.A. Elektroprivod burovoj lebyodki na baze mashiny dvojnogo pitaniya [Electric drive of drilling winch on the basis of double-feed machine]. Akademicheskij zhurnal Zapadnoj Sibiri [Academic journal of Western Siberia]. 2014. No. 4. Vol. 10. P. 36-38.

8. Grechishkin P.V., Pozolotim A.S., Rajko G.V., Samok A.V., Balandin N.N. Povyshenie ehffektivnosti krepleniya podvesnyh uzlov monorel'sovyh dorog i lebyodok v podzemnyh gornyh vyrabotkah [Improving the efficiency of fastening of the suspended nodes of roads and monorail hoists in underground mining]. Markshejderiya i nedropol'zovanie [Mine surveying and subsoil use]. 2013. No. 2. P. 45-48.

9. Abramov B.N., Sipugin K. D., K voprosu povysheniya tyagovoj sposobnosti lebyodok liftov s kanatovedushchimi shkivami [The problem of improving the traction capability of winches elevators with traction sheave]. Mekhanizaciya stroitel'stva [Mechanization of construction]. 2017. No. 6. Vol. 78. P. 36-39.

10. Kolodin A.P., SHadrina A.V., Saruev L.A. Opredelenie oblasti racional'nogo ispol'zovaniya stankov s razlichnymi tipami privodov dlya bureniya skvazhin iz podzemnyh gornyh vyrabotok [Determination of the rational use of machines with different types of drives for drilling wells from underground mining]. Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov [News of Tomsk Polytechnic University. Engineering of geo-resources]. 2011. No. 1. Vol. 319. P. 191-195.

11. SHadrina A.V. Teoreticheskie i ehksperimental'nye issledovaniya volnovyh processov v kolonne trub pri burenii skvazhin malogo diametra iz podzemnyh gornyh vyrabotok [Theoretical and experimental studies of wave processes in a pipe column during drilling of small diameter wells from underground mine workings]. Tomsk, Publishing of the Tomsk Polytechnic University, 2011. 273 P.

12. Kahiev R.N. Elektroprivody gruzopod"emnyh lebedok s povyshennoj bezopasnost'yu [Electric drives of hoisting winches with increased safety]. Tomsk, Publishing of the Tomsk state University of architecture and civil engineering, 2016. 123 P.

13. Beloglazov I.I., Ikonnikov D.A. Primenenie metoda diskretnyh ehlementov dlya modelirovaniya processa izmel'cheniya gornyh porod v shchekovoj drobilke [Application of the discrete element method for modeling the process of rock grinding in a jaw crusher]. Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Priborostroenie [News of higher educational institutions. Instrument making]. 2016. No. 9. Vol. 59. P. 780-786.

14. Budilova V.V., Pavlovich A.A., Ikonnikov D.A. Analiz rasprostraneniya deformacij po zemnoj poverhnosti pri razrabotke mestorozhdeniya otkrytym sposobom [Analysis of the distribution of deformations on the earth's surface during the development of the field by the open method]. Zapiski Gornogo instituta [Proceedings of the Mining Institute]. 2013. Vol. 204. P. 117-121.

15. Granda, J. J. The role of bond graph modeling and simulation in mechatronics systems: An integrated

software tool: CAMP-G, MATLAB–SIMULINK // Mechatronics, 2002. Vol. 12. No. 9-10. P. 1271-1295.

16. Automation and mechanical engineering [Avtomatizaciya i mashinostroenie]. URL: https://matlab.ru/solutions/industry/iam (accessed: 03.07.2018).

17. Tibing Xiao, Jinyong Huang, Youming Ge. Simulation and control of heave compensation winch for ultra-depth floating drilling // Cybernetics and Intelligent Systems (CIS) and IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics (RAM), 2017 IEEE International Conference. 2017. P. 609-613.

18. Orlov YU.A., Stolyarov D.P., Burkov V.P. Sovershenstvovanie sistemy zashchity i kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya ehlektromekhanicheskoj sistemy krana mostovogo tipa [Improvement of the system of protection and control of the technical condition of the Electromechanical system of the bridge crane]. Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal) [Mining information and analytical Bulletin (scientific and technical journal)]. 2011. No. S2. P. 363-368.

19. Petrov V.L. Obosnovanie ortonormirovannyh funkcij dlya klassov spektral'nyh modelej ehlektromekhanicheskih sistem, harakterizuyushchihsya razlichnoj stepen'yu kolebatel'nosti [Justification of orthonormal functions for classes of spectral models of Electromechanical systems characterized by varying degrees of oscillation]. Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal) [Mining information and analytical Bulletin (scientific and technical journal)]. 2013. No. 5. P. 162-173.

20. Burkov V.P., Petrov V.L. Opredelenie parametrov regulyatorov v upravlyaemoj ehlektromekhanicheskoj sisteme na osnove spektral'noj modeli v bazise funkcij CHebysheva-Lezhandra [Determination of parameters of regulators in a controlled Electromechanical system based on the spectral model in the basis of Chebyshev-Legendre functions]. Gornye nauki i tekhnologii [Mining science and technology]. 2011. No. 12. P. 14-19.

Библиографическое описание статьи

Бурков П.В., Бурков В.П., Тимофеев В.Ю., Щадрина А.В., Саруев Л.А., Буркова С.П. Математическое моделирование электромеханических систем станков для бурения скважин с различными типами приводов // Горное оборудование и электромеханика — 2018. —№ 5 (139). — С. 3-10.

Reference to article

Burkov P.V., Burkov V.P., Timofeev V.Yu., Shchadrina A.V., Saruev L.A., Burkova S.P. Mathematical modeling of electromechanical systems of machines for drilling of wells with various types of drives. Mining Equipment and Electromechanics, 2018, no. 5 (139), pp. 3-10.